

IV Reunión de Geomorfología
Grandal d'Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J., Eds.
1996, Sociedad Española de Geomorfología
O Castro (A Coruña)

MEDIDA DEL MICRORRELIEVE DEL SUELO Y ESTIMACIÓN DE LA RETENCIÓN HÍDRICA EN DEPRESIONES DE LA SUPERFICIE

Paz González, A. y Taboada Castro, M.T.

Facultad de Ciencias. A Zapateira. 15071 La Coruña

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo son analizar el efecto de la precipitación sobre el microrrelieve de la superficie del suelo y calcular la retención en microdepresiones a partir de una red de datos de altura. Mediante un rugosímetro láser se midieron perfiles en un recipiente con suelo procedente del horizonte de laboreo de un Cambisol crómico, antes y después de lluvia artificial. La superficie inicial intenta reproducir un lecho de siembra. Las superficies sucesivas se describieron mediante modelos de elevación digital con celdillas de 2 mm y resolución en altura de 0,25 mm. Índices de rugosidad como la desviación estándar de la altura o los propuestos por Linden y Van Doren (1986) permiten seguir la evolución del microrrelieve. La retención máxima en microdepresiones para el estado inicial es de 1mm, cifra que se reduce substancialmente por acción de la precipitación.

Palabras clave: Horizonte de laboreo, microrrelieve de la superficie, índices de rugosidad.

ABSTRACT

The main objectives of this study were to investigate how rainfall energy affects soil surface microrelief and to calculate depressional surface storage from grid elevation data. A non-contact laser profile meter was used to measure hight profiles of boxes filled with soil from the plough layer of a Chromic cambisol before and after simulated rain. The studied surface was thought to simulate a seedbed. Digital elevation models of the soil surfaces were developed with a resolution in hight of 0.25 mm and a grid spacing of 2 mm. Roughness indices, such as the standard deviation of hights, and the limiting slope and limiting difference, according to Linden and Van Doren (1986) were found to be sensitive to surface microrelief variations. Maximum microdepression storage was 1 mm for a horizontal initial surface, but was substantially reduced by subsequent rainfall.

Key words: Plough layer, surface microrelief, roughness indices.

INTRODUCCIÓN

Durante la primera etapa de la erosión hídrica, la formación de escorrentía viene condicionada por la degradación de la estructura de la superficie del suelo, cuyo resultado es una reducción notable del agua de lluvia infiltrada (BRESSON and BOIFFIN, 1990). Los procesos que ocurren en esta etapa todavía no se conocen adecuadamente, a pesar de que en la actualidad el estudio de la degradación física del suelo recibe una atención creciente. En consecuencia la mayor parte de los modelos para el cálculo de la erosión prescinden de la evolución de la capa superficial durante los episodios lluviosos o, en algunos casos, como ocurre en el modelo LISEM (DE ROO *et al.*, 1995), la evalúan mediante relaciones empíricas, obtenidas a partir de medidas en suelos y climas particulares.

El microrrelieve de la superficie del suelo ha sido relacionado con frecuencia con la erosión hídrica y se admite que el agua acumulada en las depresiones superficiales contribuye a favorecer la infiltración y a disminuir la escorrentía (DEXTER, 1977; HELMING *et al.*, 1993).

En los suelos de cultivo, expuestos en estado de fragmentación a la acción de la lluvia durante períodos más o menos largos, no sólo es importante conocer la relación entre infiltrabilidad y estado de la estructura superficial, sino que además conviene evaluar la importancia del agua retenida en las microdepresiones dado su efecto sobre los procesos erosivos. El método más frecuentemente utilizado es la caracterización indirecta a partir de parámetros como la rugosidad superficial (MOORE y LARSON, 1979; ØNSTAD, 1984).

El volumen de agua retenido temporalmente depende de factores como la pendiente y las labores agrícolas, y varía siguiendo la evolución del microrrelieve durante los episodios de lluvia. Las modificaciones del estado de la superficie del suelo inducidas por la precipitación se manifiestan por una disminución de la rugosidad, la porosidad y la velocidad de infiltración y dependen del conjunto de mecanismos que gobiernan los procesos de desagregación y separación de partículas y transporte y sedimentación de las mismas (BRESSON and BOIFFIN, 1990). Debido a la complejidad e interdependencia de estos procesos y de los mecanismos que los determinan, la evolución de la capa superficial del suelo en el campo depende de condiciones específicas variables y difíciles de reproducir; los estudios de laboratorio permiten, por el contrario, un análisis de la respuesta del suelo a la acción de cada uno de los procesos elementales (Le BISSONNAIS, 1988; CHEN *et al.*, 1980; BRESSON and BOIFFIN, 1990; FIES and PANINI, 1995).

Por otra parte, la rugosidad superficial ha sido estudiada a diversas escalas y con distintos instrumentos de medida. Como consecuencia, en la bibliografía se encuentran numerosos índices para describir el microrrelieve (ALMARAS *et al.*, 1966, LINDEN and VAN DORÉN, 1986; LEHRSCHE *et al.*, 1988). Los avances más recientes en la investigación de los procesos erosivos han motivado un interés creciente por la medida y modelización del microrrelieve de la superficie del suelo.

El presente trabajo se lleva a cabo en el marco de un proyecto para normalizar los métodos de medida de la rugosidad superficial en diversos países de la Unión Europea. El principal objetivo del mismo es cuantificar la retención superficial de agua de un suelo de cultivo en condiciones similares a las de siembra, cuando los riesgos de erosión son máximos.

MATERIAL Y MÉTODOS

DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El microrrelieve de una superficie similar a la de un lecho de siembra y su evolución bajo simulador de lluvia se estudió en condiciones de laboratorio, utilizando un rugosímetro de rayos láser para medir perfiles de altura.

La toma de muestra se efectuó en el horizonte de laboreo de un Cambisol crómico desarrollado sobre esquistos de Ordenes en la localidad de Mabegondo (La Coruña), cuyas características generales figuran en trabajos anteriores (TABOADA *et al.*, 1995).

La experiencia se llevó a cabo en una capa de 5 cm de espesor máximo obtenida por mezcla de agregados de distinto calibre, en proporciones que intentan reconstruir la estructura de la superficie del suelo durante la siembra de un cultivo de cereales. Los agregados de mayores dimensiones se dispusieron aleatoriamente. La preparación de estas capas se llevó a cabo en recipientes cuadrados de 58 cm x 58 cm sobre un lecho de arena fina. En la tabla 1 se presentan los datos analíticos generales de las diferentes fracciones de agregados y las proporciones utilizadas para preparar la superficie experimental inicial.

Diámetro de agregados	Materia orgánica	Nitrógeno	Arena	Limo	Arcilla	Proporción experimental
(mm)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1-2	1,36	0,15	23,5	57,4	19,1	15
2-5	1,18	0,13	30,2	51,5	18,3	35
5-10	1,28	0,14	24,6	57,4	18,0	25
10-20	1,17	0,14	22,9	56,4	20,7	15
20-30	1,08	0,13	22,4	56,4	21,2	10

Tabla 1.- Datos analíticos de los agregados en función del calibre y proporciones utilizadas en la superficie inicial.

Previamente a la preparación del lecho de siembra artificial, los agregados se humectaron lentamente por ascenso capilar, en condiciones que reducen la microfisuración. Antes del inicio de la experiencia la capa se llevó a saturación. En estas condiciones el principal mecanismo que contribuye a la desagregación es el impacto de las gotas de lluvia, y se minimiza la acción de otros, como la rotura por la acción del aire atrapado, propio de condiciones de humectación rápida o la microfisuración debida a los procesos de hinchamiento-retracción.

La rugosidad se midió en la superficie inicial y después de la aplicación de 55 mm de lluvia producida mediante simulador. En cada superficie se obtuvieron 270 perfiles separados entre sí 2 mm y cada perfil, a su vez, constaba de 270 puntos de medida efectuadas con un paso constante de 2 mm.

El rugosímetro de rayos láser utilizado ha sido descrito previamente (BERTUZZI *et al.*, 1990). En esencia consta de una fuente y un receptor de Helio-Neon (He-Ne) de baja potencia y un sistema óptico acoplado que permite proyectar verticalmente un haz de rayos emitido normalmente a la superficie del suelo y tratar las imágenes desfocalizadas que son reflejadas de modo que proporcionen perfiles de relieve. Este sistema permite eliminar las interferencias entre la curvatura de los agregados y el ángulo del haz incidente, principal

limitación de los rugosímetros clásicos. El error absoluto máximo de las medidas con el equipo utilizado es < 0.25 mm.

La formación artificial de lluvia se llevó a cabo mediante un simulador con una superficie de $1,30$ m x $1,30$ m que consta de 380 capilares, situados a $4,6$ m de la superficie experimental. Las gotas homogéneas que se producen caen sobre una red metálica en donde se fragmentan y dispersan, resultando una distribución aleatoria de tamaños. La intensidad de la lluvia aplicada fue de 30 mm/h.

TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Para reducir los efectos de borde se analizó un área de 50 cm x 50 cm lo que equivale a tomar en consideración 62.500 medidas puntuales de altura.

Los índices de rugosidad calculada fueron :

1) Diferencia de alturas máxima (D_{max}) entre los puntos más alto y más bajo del microrrelieve.

2) Rugosidad aleatoria (RA), término propuesto por ALLMARAS *et al.* (1966), pero utilizado según diversas acepciones. En este trabajo se evalúa según los criterios de CURRENCY and LOVELY (1970) mediante la desviación estándar de las medidas de altura que componen una muestra.

3) Índices de Linden y Van Doren. Se trata de dos índices de rugosidad basados en las diferencias de altura entre puntos sucesivos de un perfil para un intervalo de muestreo fijado previamente (LINDEN and VAN DOREN, 1986). El cálculo es similar al de un semivariograma de primer orden :

En primer lugar se calcula la diferencia media absoluta de alturas, DZ_h para diversas distancias :

$$DZ_h = \sum_{i=1}^n \frac{|Z_i - Z_{i+h}|}{n} \quad (1)$$

en donde, Z_i = altura medida en cada punto

Z_{i+h} = altura media en el punto situado a la distancia h

Dada la relación entre la diferencia media de alturas Z_h y la distancia X_h :

$$\frac{1}{DZ_h} = a + \frac{b}{DX_h} \quad (2)$$

se definen los índices LD (distancia límite) y LS (pendiente límite) mediante :

$$LD = \frac{1}{a} \qquad LS = \frac{1}{b}$$

Los índices de Linden y Van Doren están relacionados con características físicas del microrrelieve superficial, de modo que LD proporciona información sobre las características de la rugosidad cuando la distancia es grande y LS permite estimar la relación entre la superficie real y la proyección de la misma.

La evaluación de la retención superficial se llevó a cabo a partir de los 62.500 medidas de altura de cada superficie. El procedimiento seguido, que permite identificar cada depresión del relieve a partir del modelo de elevación digital y estimar su volumen, es similar al descrito por otros autores (MOORE and LARSON, 1979; HUANG and BRADFORD, 1990) y se resume a continuación :

En primer lugar se divide la superficie en 250 x 250 celdillas y asumiendo que cada una de ellas esta rodeada por otras ocho, se determinan direcciones de flujo de los puntos más altos a los más bajos; de este modo se identifica la red de drenaje del microrrelieve.

A continuación se identifican microdepresiones en aquellas celdillas aisladas de la red de drenaje y se calcula el número de celdillas que constituyen cada microdepresión. Como consecuencia es posible definir los puntos más bajos entre depresiones vecinas, por los que desborda el agua que contribuye a la escorrentía; estos puntos se clasifican en función de la altura.

Comenzando por el punto más bajo del relieve se construyen líneas de nivel, lo que permite elaborar un modelo de elevación digital y, tomando como referencia este punto, se calcula el volumen. Se repiten los cálculos asumiendo que las microdepresiones se van llenando de agua siguiendo las líneas de nivel, desde el punto más bajo de referencia hasta que comienzan a desbordarse. Finalmente, por diferencia entre el volumen del microrrelieve con las depresiones llenas y con ellas vacías se obtiene la cantidad de agua retenida.

Los cálculos se efectuaron mediante programas contenidos en el software PC RASTER (VAN DEURSEN and WESSELING, 1992). Para cada superficie estudiada se repitieron considerando diferentes valores de pendiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la evolución de la superficie bajo lluvia simulada se observó en los elementos estructurales de mayor tamaño (10 a 30 mm) fragmentación a favor de microfisuras, que puede frecuentemente determina la individualización de agregados de 1 a 3 mm de diámetro sobre las unidades de mayores dimensiones, y la formación de cráteres en los puntos de impacto de las gotas de mayor tamaño; paralelamente, como consecuencia de la abrasión, se observa un aumento de la esfericidad de estas unidades. La precipitación de 55 mm provoca la destrucción de los agregados originales inferiores a 1mm y después de 130 mm de lluvia acumulativa ya no se aprecian agregados inferiores a 2mm.

La disminución de la velocidad de infiltración se pone de manifiesto por la formación de charcas, que comienzan a apreciarse a partir de los 55 mm de precipitación. Esta reducción de la infiltración es consecuencia del desarrollo de una costra en la superficie del suelo. Siguiendo la terminología de BRESSON and BOIFIN (1990), inicialmente se forma una costra de tipo estructural, localizada en

las áreas ocupadas por los elementos estructurales de menores dimensiones; el desprendimiento de partículas elementales y la deposición de las mismas origina posteriormente una costra de tipo sedimentario. Después de 130 mm de precipitación la superficie encostrada esta próxima a un 25 %.

De lo anterior se infiere que la evolución de la superficie estudiada es relativamente lenta, lo que se puede atribuir al hecho de que el material de partida estuviese previamente saturado, lo que aumenta su resistencia a la acción de la lluvia así como a la importante proporción de los elementos estructurales de mayores dimensiones.

En la figura 1 se presenta el microrrelieve de la superficie inicial obtenido a partir de los perfiles de altura efectuados con rugosímetro láser y cartografiado mediante el modelo de elevación digital. Se comprueba la importancia de los agregados de mayor tamaño (20-30 mm) en la configuración de las características de la superficie.

Los valores de algunos de los índices de rugosidad más frecuentemente citados en la bibliografía se presentan en la tabla 2. La diferencia máxima de altura absoluta no corresponde a la superficie inicial, sino que se registran después de 55 mm de lluvia; después de 130 mm se obtiene un valor similar al inicial. El incremento inicial de la diferencia de alturas es consecuencia de la formación de microsurcos, debido al impacto de las gotas de lluvia; posteriormente la abrasión continua y la deposición de partículas sedimentarias reducen estas diferencias. Resultados similares han sido encontrados por HELMING *et al.* (1993).

Precipitación (mm)	Dmax (mm)	RR (mm)	LD (mm)	LS (mm)
0	33,8	4,43	12,32	4,09
55	37,4	4,17	11,46	4,02
130	33,8	3,79	10,05	3,45

Tabla 2.- Índices de rugosidad de la superficie inicial y después de la aplicación de 55 y 130 mm de lluvia artificial. (Dmax, diferencias de altura entre las cotas más alta y más baja; RR, desviación estándar de las alturas; LD y LS diferencias límite y pendiente límite, definidos de acuerdo con Linden and Van Doren).

La desviación estándar de las medidas de altura equivalen, en las condiciones experimentales de este trabajo al coeficiente de rugosidad aleatoria (RR) definido por ALLMARAS *et al.* (1966) y ampliamente utilizado. En la tabla 2 se aprecia que el índice RR va disminuyendo conforme aumenta la precipitación, por lo que permite describir la nivelación del microrrelieve. De la evolución de los valores del índice LD de Linden y Van Doren (1986) se infiere que la distancia de autocorrelación de los datos puntuales de altura disminuye con el aumento de la precipitación; la sensibilidad de los índices RR y LD a la acción de la lluvia es similar, pero los resultados proporcionados por el segundo de ellos admiten una interpretación física. Los valores del índice LS son relativamente estables después de la aplicación de 55 mm de lluvia y evolucionan posteriormente, lo que está de acuerdo con la evolución de los agregados de menores dimensiones que inicialmente se presentan individualizados y posteriormente se integran en la costra superficial.

Un ejemplo de la cartografía de retención en microdepressiones efectuada

con el modelo de cálculo a partir de los datos de elevación digital se presenta en la figura 2. Se puede observar una considerable variabilidad de la máxima altura de agua retenida en microdepressiones, que oscila entre 0 y 14 mm, aunque la superficie original pretendía ser homogénea. Esto sugiere que el proceso de almacenamiento de agua sólo se encontrará individualizado durante los episodios iniciales de una precipitación y que posteriormente deben de coexistir el llenado de las depresiones más profundas con la escorrentía superficial por desbordamiento de las someras.

Los valores de retención superficial media que se encuentran en la bibliografía son muy variables, oscilando entre 1 y 10 mm/m² (MOORE and LARSON, 1979; ONSTAD, 1984; LINDEN and VAN DOREN, 1986; HUANG and BRADFORD, 1990; HELMING *et al*, 1993), dependiendo del tipo de microrrelieve estudiado, pero sobre todo de la metodología utilizada, ya que las dimensiones de la celdilla influye considerablemente en los resultados. El máximo valor de retención media calculado en este trabajo para la superficie original (1,02 mm/m²) es comparable a los obtenidos por HUANG y BRADFORD (1990) y HELMING *et al* (1993) que también parten de datos en celdillas de 2 mm x 2 mm, con una resolución en altura similar a la de este trabajo.

En la figura 3 se presenta la retención en microdepressiones en función de la precipitación acumulativa y de la pendiente. Se aprecia como la nivelación del relieve por la acción de la energía cinética de las gotas de lluvia determina una notable reducción en la cantidad de agua almacenada. También se pone de manifiesto que la disminución de la capacidad de retención en función de la pendiente es de tipo logarítmico, lo que supone que con pendientes del orden de 3 a 4 % ya se reduce a la mitad de la que corresponde a una superficie plana con las mismas características de rugosidad.

En ausencia de datos de retención hídrica por el microrrelieve, se han efectuado con frecuencia estimaciones empíricas a partir de la rugosidad, siendo una de las más utilizadas (DE ROO *et al*, 1995) la ecuación propuesta por ONSTAD (1984):

$$RET_{max} = 0,112 RR + 0,031 RR^2 - 0,012 RR * S \quad (3)$$

en donde RET max es la máxima retención; RR, la rugosidad aleatoria y S la pendiente.

Precipitación (mm)	0	65	130
RET max calculada (mm/m ²)	1,02	0,94	0,70
RET max (Onstad) (")	1,11	1,01	0,87

Tabla 3.- Valores de retención máxima calculados a partir de datos de microrrelieve y obtenidos mediante la ecuación de Onstad para una superficie horizontal

En la tabla 3 se comparan los valores de retención máxima para una superficie horizontal calculados con el modelo empleado en este trabajo y los obtenidos mediante la ecuación de Onstad (1984). Se aprecia que la relación empírica sobrestima la retención máxima entre 7 y 24 % en la horizontal. Las diferencias entre valores calculados y estimados se hacen mucho más importantes al aumentar la pendiente.

Algunos de los modelos más recientes para evaluar la erosión son muy sensibles a los valores de retención superficial (DE ROO *et al*, 1995). En consecuencia, en el estado actual de conocimientos parece necesario continuar los estudios experimentales acerca del microrrelieve y su efecto sobre la retención superficial.

CONCLUSIONES

La caracterización del microrrelieve mediante rugosímetro láser permitió describir el estado inicial de una superficie similar a la de un lecho de siembra de cereales y su evolución mediante un modelo de elevación digital.

La capacidad de retención temporal de agua en microdepresiones es poco importante, de modo que, en superficies similares a las estudiadas y para intensidades de precipitación elevadas, no cabe esperar que juegue un papel importante en la reducción de la escorrentía. La altura media de agua retenida se reduce, por acción del impacto de las gotas de lluvia, proporcionalmente a la precipitación total y disminuye exponencialmente en función de la pendiente.

En las superficies estudiadas, la ecuación de Onstad no describe correctamente la relación entre retención en microdepresiones, rugosidad y pendiente.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLMARAS, R.R., BURWELL, R. E., LARSON, R. E., HOLT, R. F. and NELSON, W. W. 1966. *Total porosity and random roughness of the interrow zone as influenced by tillage*. USDA Conserv. Res. Report 7. U. S. Gov. Print. Office. Washington, DC.
- BERTUZZI, P., CAUSSGNAC, J. M., STENGEL, P., MOREL, G., LORENDEAU, J. Y. and PELLOUX, G. 1990. An automated, noncontact laser profile meter for measuring soil roughness in situ. *Soil Sci.*, 149 : 169-178.
- CURRENCE, H. D. and LOVELY, W. G., 1970. The analysis of soil surface roughness. *Transactions ASAE* 13 : 710-714.
- BRESSON, L. M. and BOIFFIN, J. 1990. Morphological characterization of soil crust development stages on an experimental field. *Geoderma*, 7 : 301-325.
- CHEN, Y., TARCHITZKY, J., BROUWER, J., MORIN, J. and BANIN, A. 1980. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Sci.*, 130 : 49-55.
- DEXTER, A. R., 1977. Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *J.*

- Terramechanics*, 14 : 11-22.
- De ROO, A. P. J., WESSELING, C. G., OFFERMANS, R. J. E. and RITSEMA, C. J. 1995. *LISEM. A user guide*. Dpt of Physical Geography. Utrecht University. 49 pp.
- FIES, J. C. and PANINI, T. 1995. Infiltrabilité et caractéristiques physiques des croutes formées sur massifs d'agrégats initialement secs ou humides à des pluies simulées. *Agronomie*, 15 : 205-220-
- HUANG, C. and BRADFORD, J. M. 1990. Depressional storage for markov-gaussian surfaces. *Water Resources Res* 26, 2235-2242.
- HELMING, K., ROTH, CH. H., WOLF, R and DIESTEL, H. 1993. Characterization of rainfall - microrelief interactions with runoff using parameters derived from digital elevation models (DEMs). *Soil Technology*, 6 : 273-286.
- LE BISSONNAIS, Y. 1988. *Analyse des mécanismes de désagregation et de la mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies*. Thèse. Université d'Orleans. 255 pp.
- LEHRSCHE, G. A., WHISLER, F. D. and RÖMKENS, M. J. M. 1988. Selection of a parameter describing soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52 : 1439-1445.
- LINDEN, D. R. and VAN DOREN, D. M. 1986. Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50 : 1560-1565.
- MOORE, I. D. and LARSON, C. L., 1979. Estimating micro-relief surface storage from point data. *Transactions of the ASAE*, 20 : 1073-1077.
- ONSTAD, C. A. 1984. Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the ASAE*, 27 : 729-732.
- TABOADA, M. T., GOMEZ, M. J. y PAZ, A., 1995. Variación espacial de la movilidad de Fe, Mn, Cu y Zn. *Caderno Lab. Xeolóxico de Laxe*, 20 : 7-18.
- VAN DEURSEN, W. P. A. and WESSELING, C. G., 1992. *PC-RASTER handleiding*. Dpt of physical geography. University of Utrecht. 313 pp.

Pies de figura

Figura 1.- Modelo de elevación digital de la superficie original de 50 cm x 50 cm de lado.

Figura 2.- Retención máxima en microdepresiones de la superficie original. Las alturas de agua están en mm.

Figura 3.- Relación entre retención en microdepresiones y pendiente previa a la aplicación de lluvia y después de 55 y 130 mm.





